

Brecha Digital Cuántica y Exclusión Femenina: Análisis de Acceso Diferenciado a Infraestructura de Quantum Computing en Países en Desarrollo

Elena Patricia Rodríguez
elena.rodriguez@amlentia.org

Resumen

La emergencia de las tecnologías cuánticas representa una transformación paradigmática en el panorama tecnológico global, con profundas implicaciones para la estructura económica y social del siglo XXI. Sin embargo, el acceso diferenciado a la infraestructura de computación cuántica está configurando una nueva dimensión de desigualdad tecnológica que reproduce y amplifica patrones históricos de exclusión. Este artículo examina críticamente la intersección entre la brecha digital cuántica y la exclusión de género, con particular énfasis en las barreras estructurales que enfrentan las mujeres en países en desarrollo para acceder, participar y beneficiarse de las tecnologías cuánticas. A través de un análisis multidimensional que integra perspectivas de economía del desarrollo, estudios de género y sociología de la tecnología, el trabajo identifica mecanismos específicos mediante los cuales las asimetrías de género se entrelazan con disparidades geográficas y socioeconómicas en el acceso a infraestructura cuántica. Los hallazgos revelan que la ausencia de marcos de equidad, diversidad e inclusión en el desarrollo de tecnologías cuánticas, combinada con limitaciones en educación STEM, restricciones de movilidad y sesgos institucionales, configura un escenario de exclusión múltiple que amenaza con perpetuar y profundizar las desigualdades existentes en la economía digital cuántica emergente.

Palabras clave: Brecha digital cuántica; Exclusión de género; Tecnologías cuánticas; Países en desarrollo; Infraestructura tecnológica

Clasificación JEL: O33, O35, J16, O15, O19

1. Introducción

La segunda revolución cuántica está reconfigurando fundamentalmente los cimientos tecnológicos sobre los cuales se construirá la economía global del siglo XXI (Wang and Song, 2020; Yago Malo et al., 2024). A diferencia de la primera revolución cuántica, que dio origen a tecnologías como transistores y láseres de manera casi serendípica, esta segunda ola se caracteriza por la manipulación intencional y controlada de sistemas cuánticos para crear capacidades computacionales, comunicacionales y de sensado sin precedentes (Kop, 2023; de Wolf, 2017). La computación cuántica, en particular, promete resolver problemas que son intratables para los supercomputadores clásicos más avanzados, con aplicaciones que abarcan desde el diseño de nuevos materiales y fármacos hasta la optimización de sistemas energéticos y financieros (Priyanka et al., 2024; Ho et al., 2024; Ajagekar and You, 2022).

Sin embargo, mientras la narrativa dominante sobre las tecnologías cuánticas enfatiza su potencial transformador y democratizador (Seskir et al., 2023), evidencias emergentes sugieren que su desarrollo y despliegue están reproduciendo y, potencialmente, amplificando patrones históricos de desigualdad tecnológica (Troyer et al., 2024; Wheatley Research Consultancy, 2024). El acceso a infraestructura de computación cuántica, así como a la educación, capacitación y oportunidades laborales asociadas, se encuentra altamente concentrado en un reducido número de países de altas ingresos y, dentro de estos, en instituciones de élite y corporaciones tecnológicas globales (de Jong, 2022; Vermaas, 2017). Esta concentración geográfica y socioeconómica del desarrollo cuántico configura lo que diversos autores han comenzado a denominar la "brecha digital cuántica" (Seskir et al., 2023; Wolbring, 2022).

La brecha digital cuántica no constituye simplemente una extensión de las brechas digitales tradicionales asociadas con el acceso a internet y tecnologías de información y comunicación, aunque ciertamente está vinculada a ellas (Bulatova et al., 2023; Lahiri, 2024; Warschauer, 2003). Más bien, representa una nueva capa de estratificación tecnológica que opera en niveles múltiples: desde el acceso físico a hardware cuántico y infraestructura computacional, hasta la capacidad de desarrollar algoritmos cuánticos, participar en la investigación de vanguardia y capturar los beneficios económicos de estas tecnologías emergentes (Possati, 2024; Arrow et al., 2023). Como señalan Coenen et al. (2022), existe el riesgo real de que las tecnologías cuánticas repliquen los "fascos de implementación" observados en olas tecnológicas previas, donde los beneficios se concentraron en élites técnicas y económicas mientras que los costos y disrupciones se distribuyeron de manera más amplia.

Esta estratificación tecnológica adquiere particular relevancia cuando se examina desde una perspectiva de género. A pesar del reconocimiento creciente de que la diversidad

y la inclusión son esenciales tanto por razones de justicia social como de eficiencia innovadora (Damayanti, 2024; Meyer, 2023), el campo de las tecnologías cuánticas exhibe marcadas asimetrías de género que se manifiestan en múltiples dimensiones. La participación femenina en investigación cuántica, educación especializada y empleo en el sector es significativamente menor que la de sus contrapartes masculinas, una disparidad que se acentúa dramáticamente en contextos de países en desarrollo (Wolbring, 2022; Nita et al., 2021).

La intersección entre la brecha digital cuántica y la exclusión de género configura un escenario de "exclusión múltiple" particularmente preocupante. Las mujeres en países en desarrollo enfrentan barreras estructurales superpuestas que limitan su acceso a educación STEM de calidad, oportunidades de investigación avanzada, redes profesionales internacionales y recursos financieros necesarios para participar en el ecosistema cuántico emergente (Ebua, 2023; Saleem and Higuchi, 2014; Raja and Christiaensen, 2017). Estas barreras se ven exacerbadas por factores culturales, institucionales y económicos que operan tanto a nivel macro como micro, desde políticas nacionales de ciencia y tecnología que ignoran consideraciones de género hasta prácticas discriminatorias en instituciones académicas y corporaciones tecnológicas (Seskir et al., 2023; Krishnamurthy, 2022).

El análisis de esta intersección entre brecha digital cuántica y exclusión femenina es de importancia crítica por múltiples razones. Primero, desde una perspectiva de justicia social y derechos humanos, la exclusión sistemática de más de la mitad de la población global, y particularmente de aquellas en contextos ya marginalizados, del acceso a tecnologías que definirán las estructuras económicas y sociales futuras constituye una forma de injusticia estructural que requiere atención urgente (Krishnamurthy, 2022; Troyer et al., 2024). Segundo, desde un punto de vista de eficiencia y optimización del desarrollo tecnológico, la exclusión de diversos talentos y perspectivas limita el potencial innovador del campo cuántico y puede resultar en tecnologías que no responden adecuadamente a las necesidades de poblaciones diversas (Meyer, 2023; Arrow et al., 2023). Tercero, desde una óptica de desarrollo económico, la perpetuación de estas brechas amenaza con profundizar las desigualdades globales existentes y crear nuevas formas de dependencia tecnológica que limitarán las posibilidades de desarrollo autónomo de países del Sur Global (Rodrigues and Costa, 2018; Gu, 1999; Juma et al., 2001).

A pesar de la importancia crítica de estos temas, la investigación sistemática sobre la intersección entre género, brecha digital cuántica y desarrollo sigue siendo sorprendentemente escasa. Como documenta el trabajo seminal de Wolbring (2022), en una muestra de más de 362,000 resúmenes técnicos sobre tecnologías cuánticas, el término "social" apareció en apenas 0.24% de los casos, y los marcos de equidad, diversidad e inclusión estaban completamente ausentes. Esta invisibilización de consideraciones sociales y de género en

el discurso técnico dominante sobre tecnologías cuánticas refleja y refuerza patrones de exclusión epistémica que limitan nuestra comprensión de las dimensiones humanas de estas transformaciones tecnológicas (Vermaas, 2017; Kop, 2023).

El presente artículo busca contribuir a llenar este vacío crítico en la literatura mediante un análisis comprehensivo de los mecanismos mediante los cuales se configuran las brechas de acceso a infraestructura de computación cuántica con particular énfasis en las dimensiones de género en contextos de países en desarrollo. El análisis integra perspectivas teóricas de la economía del desarrollo tecnológico, estudios críticos de género y tecnología, y la literatura emergente sobre implicaciones sociales de tecnologías cuánticas para construir un marco analítico multidimensional que capture la complejidad de estos fenómenos.

La estructura del artículo es la siguiente. La sección 2 desarrolla el marco teórico situando la brecha digital cuántica en el contexto más amplio de la literatura sobre brechas digitales y desarrollo tecnológico desigual. La sección 3 examina específicamente las dimensiones de género en el acceso a tecnologías emergentes, identificando patrones históricos y mecanismos de exclusión. La sección 4 analiza el estado actual de la infraestructura cuántica en países en desarrollo, documentando las disparidades existentes. La sección 5 identifica y analiza las barreras específicas que enfrentan las mujeres para participar en el ecosistema cuántico. La sección 6 explora las implicaciones económicas y sociales de estas brechas, tanto para individuos como para sociedades. La sección 7 presenta las conclusiones y reflexiones finales sobre los desafíos y oportunidades para promover un desarrollo más equitativo e inclusivo de las tecnologías cuánticas.

2. Marco Teórico: Brecha Digital y Tecnologías Cuánticas

El concepto de "brecha digital" ha evolucionado significativamente desde sus formulaciones iniciales en la década de 1990, cuando se definía primariamente en términos del acceso físico a computadoras y conexión a internet (Warschauer, 2003). La investigación posterior ha revelado que la brecha digital es un fenómeno multidimensional que abarca no solo el acceso a infraestructura tecnológica, sino también las capacidades, habilidades y contextos sociales que determinan el uso efectivo y significativo de las tecnologías (Lahiri, 2024; Bulatova et al., 2023).

Warschauer (2003) argumenta convincentemente que debemos movernos más allá de la noción simplificada de "brecha digital" hacia un enfoque de "inclusión social tecnológica" que reconozca que lo más importante no es la mera disponibilidad física de computadoras e internet, sino la capacidad de las personas de utilizar estas tecnologías para

participar en prácticas sociales significativas. Esta perspectiva más matizada reconoce que el acceso tecnológico está mediado por múltiples factores que incluyen alfabetización digital, capital cultural, redes sociales, contextos institucionales y estructuras económicas más amplias.

En el contexto de países en desarrollo, la brecha digital tradicional ha sido objeto de extensa investigación que documenta disparidades persistentes no solo entre países del Norte y Sur Global, sino también dentro de países en desarrollo, donde factores como ubicación urbana versus rural, nivel socioeconómico, género, edad y etnicidad median significativamente el acceso y uso de tecnologías digitales (Pohjola, 2001; Dahlman et al., 2016; Heeks and Bukht, 2018). Pohjola (2001) demuestra que el uso de tecnologías de información en la producción de bienes y servicios ha tenido una influencia fuerte en la productividad y crecimiento económico en países industrializados y recientemente industrializados, pero que los países en desarrollo no han invertido en estas tecnologías ni se han beneficiado de estos investimentos en la misma medida, creando el riesgo de una división creciente entre países ricos y pobres basada en el acceso a la información como commodity.

La literatura sobre desarrollo tecnológico en países del Sur Global ha identificado múltiples dimensiones de esta brecha que van más allá del acceso a infraestructura física. Lee (2001) enfatiza el papel crítico del capital humano como capacidad de absorción para nuevas tecnologías, demostrando que el stock de capital humano, particularmente en los niveles secundario y terciario de educación, desempeña un papel clave en determinar el desarrollo de tecnologías de información y comunicación. Gu (1999) desarrolla las implicaciones de los Sistemas Nacionales de Innovación para países en desarrollo, identificando gaps críticos en la preparación de personas para el cambio y el desarrollo insuficiente de bases de conocimiento necesarias para enfoques intensivos en aprendizaje.

La investigación sobre la intersección entre globalización, tecnología y desarrollo económico revela patrones complejos de convergencia y divergencia. Rodrigues and Costa (2018) analiza la posición jerárquica de países en desarrollo en el sistema económico mundial a través de la División Internacional del Trabajo, demostrando que mientras algunas economías emergentes de la semiperiferia están avanzando, otras enfrentan riesgos de retroceso. Las experiencias de industrialización tardía evidencian la necesidad de estrategias claras en desarrollo tecnológico para aumentar productividad y competitividad, donde la gestión de tecnología e innovación desempeña un papel crucial (Karodia et al., 2014).

Juma et al. (2001) examina la gobernanza global de la tecnología en el contexto de las necesidades de países en desarrollo, argumentando que alcanzar los Objetivos de Desarrollo del Milenio requiere esfuerzos concentrados para aumentar la productividad económica en el mundo en desarrollo y redirigir actividades de investigación y desarrollo. El autor

identifica dos categorías críticas de medidas: aquellas adoptadas por los propios países en desarrollo para promover investigación científica e innovación tecnológica como elemento clave de política de desarrollo económico, y medidas que pueden ser adoptadas en países industrializados para contribuir a la solución de problemas en países en desarrollo.

El papel de instituciones educativas en el desarrollo económico de países en desarrollo ha sido objeto de atención particular. Saleem and Higuchi (2014) explora el rol estratégico de instituciones académicas utilizando análisis de teoría de juegos, construyendo un modelo de juego sujeto a política preferencial entre gobierno y universidades. Los resultados demuestran claramente que tener un órgano autónomo para regular políticas educacionales puede promover innovación y adopción de tecnología. Rosario (2012) examina la implementación de TIC en el sector educacional en países en desarrollo, argumentando que dado el costo de TIC y la escasez de recursos en estos contextos, la promulgación y aplicación juiciosa de políticas de TIC en educación no es solo sabia sino necesaria.

La literatura sobre economía digital en países en desarrollo enfatiza tanto las oportunidades como los desafíos asociados con la transformación digital. Dahlman et al. (2016) examina por qué la economía digital importa para países en desarrollo y qué deben considerar al desarrollar estrategias digitales nacionales. Los autores argumentan que la revolución digital puede ser aprovechada para crecimiento inclusivo y sustentable, pero que esto no ocurre aleatoriamente: los gobiernos deben participar en planificación estratégica para maximizar el impacto de desarrollo de la digitalización y garantizar distribución equitativa de los beneficios. Heeks and Bukht (2018) examina la parte de la producción económica derivada exclusivamente o principalmente de tecnologías digitales, concluyendo que la realidad de la economía digital está aquí de su potencial en países en desarrollo debido a una serie de desafíos que incluyen infraestructura digital incompleta, costosa y de bajo desempeño, déficit en capacidades humanas, financiamiento débil y gobernanza precaria.

En el contexto específico de las tecnologías cuánticas, la literatura emergente sugiere que estas dinámicas de desigualdad tecnológica se están reproduciendo y potencialmente amplificando. Seskir et al. (2023) analiza la democratización en tecnologías cuánticas a través de tres teorías de democracia (participativa, representativa, deliberativa), identificando que empresas de computación cuántica utilizan el concepto de democratización de forma estrecha y limitada. Los esfuerzos actuales de democratización incluyen diferentes formas de acceso, comunidades de base, grupos de interés especial y una cultura emergente de manifiestos, pero estos esfuerzos son necesarios mas no suficientes para considerar las tecnologías cuánticas un campo democratizado, requiriendo mayor reflexividad y responsividad de los actores del campo.

El trabajo pionero de Wolbring (2022) proporciona evidencia cuantitativa sorprendente

sobre la invisibilización de consideraciones sociales en el desarrollo de tecnologías cuánticas. En un análisis masivo de 362,728 resúmenes técnicos y 1,062 resúmenes no técnicos, el término "social" apareció en apenas 867 de los 362,728 resúmenes técnicos (0.24%). De 200 términos sociales testados, 87 no fueron mencionados, 47 aparecieron en menos de 10 resúmenes, 30 entre 10-100, y solo 29 en más de 100. Críticamente, los marcos de equidad, diversidad e inclusión (EDI) estaban completamente ausentes, así como muchos grupos marginalizados. Estos hallazgos revelan vastas oportunidades para el compromiso con lo "social" en tecnologías cuánticas, pero también señalan la necesidad urgente de intervenciones para evitar la reproducción de patrones históricos de exclusión.

de Jong (2022) desarrolla un marco anticipatorio basado en análisis histórico de tecnologías sistémicas por el Consejo Científico para Política Gubernamental holandés (WRR), proponiendo una estrategia con cinco dimensiones concretas para preparar a la sociedad para la era cuántica: desmistificación para combatir percepciones irrealistas, contextualización invirtiendo en un ambiente sociotécnico facilitador, compromiso involucrando a stakeholders y sociedad civil, regulación creando marcos flexibles, y posicionamiento desarrollando "diplomacia cuántica internacional". El objetivo es permitir que la sociedad guíe el desarrollo e impacto de las tecnologías cuánticas.

Vermaas (2017) identifica un problema crítico en el framing actual de la teoría cuántica como "enigmática", argumentando que este framing perjudica el debate societal. El autor argumenta que un prerrequisito para el debate social es que todos los stakeholders comprendan las tecnologías en un grado razonable, proponiendo que los filósofos de la física pueden ayudar explicando cómo la teoría cuántica y las tecnologías cuánticas son similares a descripciones y tecnologías cotidianas. Esta es una llamada urgente para hacer la teoría cuántica comprensible y accesible.

Troyer et al. (2024) define tres prioridades estratégicas para la computación cuántica que son particularmente relevantes para cuestiones de equidad: Impacto (garantizar que la computación cuántica beneficie a toda la humanidad desarrollando soluciones para problemas globales críticos como la crisis climática, inseguridad alimentaria y enfermedades generalizadas), Uso (proteger contra uso malicioso acelerando el despliegue de criptografía resistente a computación cuántica y desarrollando procesos de gobernanza), y Acceso (democratizar el potencial de crecimiento económico a través de desarrollo de habilidades, fuerza laboral, ecosistema e infraestructura digital). Los autores argumentan que ninguna entidad sola realizará un computador cuántico tolerante a fallas; esto requiere asociaciones profundas entre industria, gobiernos y academia.

Kop (2023) redefine Quantum-ELSPI (Implicaciones Éticas, Legales, Sociales y de Política) como un metaparadigma que conecta la investigación en tecnologías cuánticas inextricablemente con cuestiones que surgen de su introducción en la sociedad. Este enfo-

que comunicó una aproximación inherentemente interdisciplinaria para entender y abordar el desarrollo y utilización de tecnologías cuánticas de segunda generación, proporcionando ejemplos concretos de cómo las tecnologías cuánticas pueden ser aplicadas en múltiples industrias mientras explora cuestiones potenciales en subdominios éticos, legales, sociales y de política.

La literatura sobre las implicaciones sociales de la computación cuántica enfatiza la necesidad urgente de abordar cuestiones de equidad y acceso desde las primeras etapas de desarrollo tecnológico. Wheatley Research Consultancy (2024) explora el potencial transformador de la computación cuántica en estructuras societales, focalizando en tres áreas principales: seguridad de datos, privacidad y marcos económicos. El análisis examina preocupaciones de privacidad vía capacidades ampliadas de minería de datos y vigilancia, y discute transformaciones económicas anticipadas conforme industrias y mercados laborales se adaptan, enfatizando la necesidad de cooperación global en formulación de políticas para despliegue responsable.

Possati (2024) desarrolla una evaluación hermenéutica de tecnologías cuánticas ofreciendo una "evaluación de visión" que lleva a análisis socio-ético. El autor propone una distinción de tres niveles en el análisis de creación y comunicación de significados sociales para tecnologías cuánticas: ficciones, popularización y periodismo científico. Define líneas de acción para aumentar aceptación social y confianza en tecnologías cuánticas, argumentando que el framing actual de teoría cuántica como enigmática no ayuda a los stakeholders a entender las tecnologías.

Esta revisión de literatura revela que mientras existe un reconocimiento creciente de la importancia de consideraciones sociales, éticas y de equidad en el desarrollo de tecnologías cuánticas, persisten gaps significativos tanto en la investigación como en la práctica. La intersección específica entre brecha digital cuántica, género y desarrollo ha recibido atención limitada, a pesar de su importancia crítica para garantizar que las tecnologías cuánticas contribuyan a un desarrollo más equitativo e inclusivo en lugar de exacerbar desigualdades existentes.

3. Género y Acceso a Tecnologías Emergentes

La relación entre género y acceso a tecnologías ha sido objeto de extensa investigación en el contexto de tecnologías digitales tradicionales, revelando patrones persistentes de desigualdad que operan en múltiples niveles y dimensiones. La literatura sobre brecha digital de género documenta no solo disparidades en acceso físico a tecnologías, sino también diferencias significativas en tipos de uso, habilidades digitales, confianza tecnológica y capacidad de traducir competencias digitales en oportunidades económicas y sociales

(Lahiri, 2024; Bulatova et al., 2023).

Lahiri (2024) investiga la relación entre división digital y desigualdad social en la era digital contemporánea, demostrando que la división digital exagera disparidades sociales existentes basadas en estatus socioeconómico, raza, género y localización geográfica. El acceso desigual a tecnologías digitales impacta educación, empleo y compromiso cívico de maneras que son profundamente generizadas. Las mujeres, particularmente en contextos de países en desarrollo, enfrentan barreras múltiples y superpuestas en su acceso y uso de tecnologías digitales que reflejan y refuerzan estructuras más amplias de desigualdad de género.

La intersección entre desarrollo tecnológico y desigualdad de género ha sido analizada extensamente en el contexto de la automatización y la inteligencia artificial, proporcionando lecciones importantes para comprender las dinámicas emergentes en tecnologías cuánticas. Sultana et al. (2024) examina las implicaciones macroeconómicas de la automatización y la IA en mercados laborales y empleo, documentando que la IA y la automatización desplazan trabajo manual y rutinario pero crean oportunidades en posiciones de alta cualificación como seguridad digital, análisis de datos e ingeniería de IA. Críticamente, los beneficios de la automatización no se dispersan uniformemente y frecuentemente exageran disparidades económicas existentes, con implicaciones particulares para mujeres que están sobrerrepresentadas en ocupaciones rutinarias vulnerables a la automatización.

Kuban State Agrarian University et al. (2025) demuestra que la automatización de profesiones de baja cualificación como conductores y vendedores tiene una probabilidad de sustituir hasta 98 % de estos empleos. La automatización aumenta productividad y crea nuevas profesiones como analistas de datos y desarrolladores de IA, pero profundiza desigualdades en el acceso a recursos y tecnologías. El gap algorítmico es agravado por acceso limitado a internet y habilidades digitales en regiones remotas, con mujeres en estas áreas enfrentando desventajas compuestas.

La literatura sobre IA y mercados laborales revela patrones de impacto diferenciado por género que son instructivos para anticipar dinámicas similares en el contexto de tecnologías cuánticas. Cazzaniga (2024) argumenta que economías avanzadas experimentarán beneficios y armadillas de la IA más temprano debido a la estructura de empleo focalizada en funciones cognitivo-intensivas. Significativamente, el análisis revela que mujeres e individuos con educación universitaria están más expuestos a la IA, pero también mejor posicionados para cosechar beneficios. Sin embargo, la desigualdad de renta laboral puede aumentar si la complementariedad entre IA y trabajadores de altos ingresos es fuerte, y las mujeres pueden estar en desventaja si existen brechas en acceso a educación y formación en campos tecnológicos emergentes.

Frank et al. (2019) enfatiza que la IA y la automatización pueden aumentar la pro-

ductividad de algunos trabajadores pero sustituir el trabajo de otros, ocurriendo en un período de desigualdad económica creciente. Las barreras para comprender completamente el impacto incluyen falta de datos de alta calidad sobre la naturaleza del trabajo, modelos insuficientemente informados sobre sustitución de habilidades y comprensión limitada de cómo tecnologías cognitivas interactúan con dinámicas económicas. La dimensión de género es particularmente crítica pero permanece subexplorada en muchos análisis.

La investigación sobre segregación de género en campos STEM (Ciencia, Tecnología, Ingeniería y Matemáticas) proporciona contexto esencial para comprender las barreras que enfrentan las mujeres en el acceso a tecnologías emergentes como la computación cuántica. A pesar de décadas de esfuerzos para promover la participación femenina en STEM, persisten disparidades significativas en tasas de participación, progresión profesional y representación en posiciones de liderazgo. Estas disparidades son particularmente pronunciadas en campos altamente técnicos y matemáticamente intensivos, precisamente las áreas centrales para el desarrollo de tecnologías cuánticas (Nita et al., 2021).

Nita et al. (2021) propone el concepto de "alfabetización cuántica" (quantum literacy) como medio de abordar la necesidad de investigación transdisciplinaria en respuesta a problemas complejos en el corazón de cuestiones sobre sustentabilidad global, contribuyendo al Objetivo de Desarrollo Sostenible 4 de las Naciones Unidas (Educación de Calidad). Los autores argumentan que la alfabetización cuántica aborda desafíos de aprendizaje dentro de una disciplina altamente limitada y de acceso al tipo de conocimiento poderoso que debería ser más accesible a un grupo amplio de aprendices. Sin embargo, reconocen implícitamente que las barreras para acceder a esta alfabetización son distribuidas desigualmente, con implicaciones particulares para grupos tradicionalmente excluidos de educación avanzada en física y matemáticas, incluyendo mujeres.

La literatura sobre educación y formación tecnológica en países en desarrollo revela cómo las desigualdades de género en acceso a educación de calidad en STEM se entrelazan con limitaciones de recursos, restricciones culturales y prioridades de política pública. Saleem and Higuchi (2014) demuestra que las instituciones educativas pueden afectar el crecimiento económico de países en desarrollo, pero que las políticas educacionales deben ser cuidadosamente diseñadas para promover inclusión. El estudio en profundidad del sistema educacional de Pakistán revela cómo factores culturales y estructurales limitan particularmente el acceso de niñas y mujeres jóvenes a educación de calidad en campos técnicos.

Raja and Christiaensen (2017) analiza el impacto de tecnologías digitales (robótica, TIC, inteligencia artificial) en la transformación del mundo del trabajo, enfatizando que las tecnologías digitales cambian los tipos de habilidades demandadas por empleadores. Este cambio presenta un riesgo de disrupción y amenaza para aquellos lentos o incapaces de

ajustarse a cambios tecnológicos. Las mujeres en países en desarrollo enfrentan desventajas compuestas en este contexto debido a acceso limitado a educación técnica, restricciones de movilidad, responsabilidades de cuidado no remunerado y discriminación en mercados laborales.

La dimensión de género en el acceso a financiamiento para emprendimientos tecnológicos constituye otra barrera significativa. Las empresarias tecnológicas, particularmente en países en desarrollo, enfrentan desafíos desproporcionados en acceso a capital de riesgo, financiamiento de investigación y recursos para desarrollar innovaciones tecnológicas. Esta brecha de financiamiento limita la capacidad de mujeres para participar como creadoras y emprendedoras en campos tecnológicos emergentes, confinándolas frecuentemente a roles de usuarias o trabajadoras en lugar de innovadoras y líderes.

La literatura sobre sesgos de género en sistemas de IA y tecnologías algorítmicas sugiere que las tecnologías cuánticas pueden enfrentar riesgos similares si no se abordan proactivamente cuestiones de diversidad e inclusión en su desarrollo. Lainjo (2024) identifica que los sesgos en sistemas de IA perpetúan discriminación y prejuicios sociales, enfatizando la división digital como cuestión crítica. Los países de altos ingresos versus países de bajos y medianos ingresos presentan disparidades significativas en el impacto de la IA, con necesidad urgente de desarrollo responsable de IA y políticas inclusivas.

Los patrones de participación de género en comunidades de investigación y desarrollo tecnológico revelan dinámicas de exclusión que operan tanto a nivel formal como informal. Las redes profesionales, colaboraciones de investigación, conferencias académicas y espacios de innovación tecnológica frecuentemente exhiben culturas y prácticas que marginalizan o excluyen a mujeres. Estas dinámicas son particularmente pronunciadas en campos técnicamente intensivos y históricamente dominados por hombres, como la física cuántica y la computación avanzada.

La interseccionalidad es un marco analítico crítico para comprender cómo múltiples dimensiones de identidad y posición social (género, clase, raza, etnicidad, geografía, entre otras) se entrelazan para producir experiencias únicas de privilegio y marginación. En el contexto del acceso a tecnologías cuánticas, las mujeres en países en desarrollo no enfrentan simplemente la suma de barreras de género y barreras geográfico-económicas, sino configuraciones únicas de exclusión que emergen de la interacción entre estas dimensiones (Ebua, 2023).

Ebua (2023) investiga el potencial de la tecnología para promover desarrollo económico, social y ambiental en países en desarrollo a través de los Objetivos de Desarrollo Sostenible de las Naciones Unidas. Los hallazgos principales enfatizan que la tecnología posee gran potencial para promover desarrollo, pero su implementación debe ser guiada por consideraciones éticas y compromiso con justicia social. La necesidad de colaboración in-

terdisciplinaria y aproximaciones participativas en el desarrollo de soluciones tecnológicas es particularmente crítica para garantizar que las voces y necesidades de grupos marginados, incluyendo mujeres en países en desarrollo, sean incorporadas desde las primeras etapas de diseño e implementación tecnológica.

Los roles de género en el cuidado no remunerado y trabajo doméstico constituyen una barrera estructural significativa pero frecuentemente invisibilizada para la participación femenina en campos tecnológicos intensivos en tiempo y recursos. La investigación y desarrollo en tecnologías cuánticas típicamente requieren dedicación de tiempo extensiva, disponibilidad para viajes internacionales, participación en redes profesionales y capacidad de relocalizarse geográficamente para acceder a centros de excelencia. Estas demandas son particularmente desafiantes para mujeres que llevan responsabilidades desproporcionadas de cuidado familiar y enfrentan expectativas sociales restrictivas sobre movilidad y autonomía.

La literatura emergente sobre ética cuántica y responsabilidad social en el desarrollo de tecnologías cuánticas proporciona un marco importante para abordar cuestiones de género e inclusión. Damayanti (2024) examina la convergencia entre física cuántica, metaética y la era digital, identificando obstáculos principales como preocupaciones con privacidad, seguridad y potencial para toma de decisiones sesgadas. El autor propone un marco ético abarcador integrando principios de mecánica cuántica y metaética, argumentando que una estrategia abarcadora priorizando cuestiones éticas es crítica para el desarrollo de tecnologías cuánticas. Críticamente, este marco debe incluir explícitamente consideraciones de género y equidad para evitar la reproducción de sesgos existentes.

Meyer (2023) presenta el Quantum Ethics Project (QEP) y desarrollo curricular en curso para crear uno de los primeros cursos completos sobre Ética e Impactos Sociales de Tecnología Cuántica. Este trabajo pionero reconoce explícitamente que cuestiones de equidad, diversidad e inclusión deben ser centrales en la educación cuántica, no periféricas o secundarias. Sin embargo, el desafío permanece en traducir estos compromisos normativos en prácticas concretas que efectivamente promuevan la participación de grupos tradicionalmente excluidos, incluyendo mujeres en países en desarrollo.

4. Infraestructura Cuántica en Países en Desarrollo

La distribución global de infraestructura de computación cuántica exhibe una concentración geográfica extrema que refleja y amplifica patrones históricos de desigualdad tecnológica. Los computadores cuánticos de mayor capacidad, las instalaciones de investigación más avanzadas, las inversiones de capital más significativas y las concentraciones de expertise técnico están localizados predominantemente en un pequeño número de países

de altos ingresos, principalmente Estados Unidos, China, varios países de Europa Occidental, y en menor medida Japón, Corea del Sur y Canadá (Seskir et al., 2023; Troyer et al., 2024).

Esta concentración geográfica no es simplemente el resultado de dinámicas naturales de mercado o distribución neutral de capacidades técnicas, sino que refleja factores históricos, políticos y económicos complejos que han estructurado el sistema global de ciencia y tecnología. La herencia de colonialismo, patrones de inversión en investigación y desarrollo, estructuras de propiedad intelectual, flujos de talento científico y configuraciones geopolíticas de poder han contribuido todas a esta distribución altamente asimétrica de capacidades cuánticas (Rodrigues and Costa, 2018; Juma et al., 2001).

Rodrigues and Costa (2018) demuestra que la posición jerárquica de países en desarrollo en el sistema económico mundial, analizada a través de la División Internacional del Trabajo, revela que mientras algunas economías emergentes de la semiperiferia están avanzando (notablemente China en el contexto de tecnologías cuánticas), muchas otras enfrentan riesgos de retroceso relativo. Las experiencias de industrialización tardía evidencian que sin estrategias claras en desarrollo tecnológico, los países en desarrollo corren el riesgo de ser relegados a posiciones de proveedores de materias primas o mano de obra de bajo costo en cadenas globales de valor tecnológico.

El acceso a hardware cuántico representa la primera y más visible dimensión de la brecha de infraestructura. Los computadores cuánticos más avanzados son dispositivos extremadamente costosos y técnicamente complejos que requieren condiciones operacionales específicas, incluyendo refrigeración criogénica cerca del cero absoluto, aislamiento vibracional sofisticado y sistemas de control electrónico altamente especializados. El costo de adquisición, instalación y mantenimiento de estos sistemas está fuera del alcance de la mayoría de instituciones en países en desarrollo (Arora and Kumar, 2024).

Arora and Kumar (2024) alerta que los impactos ambientales de la computación cuántica (huella de carbono, generación de e-waste, uso de minerales, consumo de agua y energía) permanecen ampliamente desconocidos, similar a lo ocurrido en la revolución de semiconductores. Los autores proponen un marco de computación cuántica consciente del carbono (carbon-aware quantum computing - CQC) proporcionando una metodología fundamental para calcular la huella de carbono total del ciclo de vida completo de una plataforma de computación cuántica: producción, uso y descarte. Esta dimensión ambiental de la infraestructura cuántica presenta desafíos adicionales para países en desarrollo que frecuentemente carecen de capacidades técnicas y regulatorias para gestionar los impactos ambientales de tecnologías avanzadas.

Más allá del hardware físico, la infraestructura cuántica comprende múltiples capas de capacidades técnicas, institucionales y humanas. La infraestructura de software cuántico,

incluyendo lenguajes de programación cuántica, compiladores, simuladores y herramientas de desarrollo de algoritmos, está siendo desarrollada principalmente por corporaciones tecnológicas grandes y laboratorios de investigación en países de altos ingresos. Si bien muchas de estas herramientas están disponibles como plataformas de código abierto o acceso cloud, su uso efectivo requiere conocimientos especializados, conexiones de internet de alta velocidad y acceso a recursos computacionales complementarios que frecuentemente son limitados en contextos de países en desarrollo (Heeks and Bukht, 2018).

Heeks and Bukht (2018) examina la realidad de la economía digital en países en desarrollo, concluyendo que está aquí de su potencial debido a una serie de desafíos estructurales. La infraestructura digital es frecuentemente incompleta, costosa y de bajo desempeño. El ecosistema digital más amplio sufre déficit en capacidades humanas, financiamiento débil y gobernanza precaria. Estos mismos desafíos se aplican, pero amplificados, en el contexto de infraestructura cuántica que es aún más demandante en términos de requisitos técnicos y de recursos.

La infraestructura educacional y de investigación necesaria para formar especialistas en tecnologías cuánticas representa otra dimensión crítica de brecha. Los programas educacionales en física cuántica, ciencia de la computación cuántica e ingeniería cuántica requieren laboratorios especializados, equipos de medición sofisticados, acceso a recursos computacionales y, fundamentalmente, cuerpos docentes con expertise avanzado. La mayoría de las universidades en países en desarrollo carecen de estos recursos, limitando severamente su capacidad de formar la próxima generación de científicos e ingenieros cuánticos (Nita et al., 2021; Saleem and Higuchi, 2014).

Saleem and Higuchi (2014) demuestra que las políticas educacionales juegan un papel crítico en promover innovación y adopción de tecnología en países en desarrollo. Sin embargo, las inversiones necesarias en educación cuántica (desde equipamiento de laboratorio hasta salarios competitivos para atraer y retener docentes especializados) representan desafíos significativos para sistemas educacionales ya tensionados por recursos limitados y demandas competitivas. El riesgo es que las brechas educacionales en tecnologías cuánticas perpetúen y profundicen desigualdades tecnológicas más amplias.

La movilidad internacional de talento científico y técnico constituye un factor adicional que exacerba las disparidades en infraestructura cuántica. Los individuos de países en desarrollo que obtienen formación avanzada en física cuántica o computación cuántica frecuentemente enfrentan oportunidades de carrera limitadas en sus países de origen debido a la ausencia de infraestructura de investigación adecuada, financiamiento competitivo y ecosistemas de innovación robustos. Esto resulta en "fuga de cerebros" donde talento entrenado en países en desarrollo migra permanentemente a centros de excelencia en países de altos ingresos, privando a sus países de origen de expertise crítico y perpetuando ciclos

de dependencia tecnológica (Lee, 2001).

Lee (2001) analiza el papel de la educación en la preparación tecnológica, demostrando que el capital humano, particularmente en niveles secundario y terciario de educación, desempeña un papel clave en determinar el desarrollo de tecnologías. La movilidad internacional de individuos educados representa tanto una oportunidad (exposición a conocimientos y redes avanzadas) como un desafío (pérdida de talento crítico) para países en desarrollo. Las políticas para promover circulación de talento en lugar de fuga unidireccional requieren inversiones significativas en infraestructura de investigación doméstica y creación de condiciones propicias para innovación.

El acceso a redes de colaboración internacional y participación en comunidades globales de investigación cuántica es mediado por factores que van más allá de capacidades técnicas individuales. La participación efectiva en conferencias internacionales, colaboraciones de investigación y proyectos multinacionales requiere recursos financieros para viajes, tiempo liberado de otras responsabilidades, fluidez en idiomas dominantes (particularmente inglés), y capital social en forma de conexiones profesionales existentes. Investigadores en países en desarrollo frecuentemente enfrentan barreras en todas estas dimensiones, limitando su capacidad de participar plenamente en las fronteras del desarrollo cuántico (Wolbring, 2022).

La infraestructura de financiamiento para investigación cuántica exhibe asimetrías pronunciadas. Los programas de financiamiento gubernamental para investigación cuántica en países de altos ingresos (como la Quantum Initiative Nacional de Estados Unidos, el Quantum Flagship de la Unión Europea, y programas masivos en China) operan con presupuestos de miles de millones de dólares. En contraste, las inversiones en investigación cuántica en la mayoría de países en desarrollo son mínimas o inexistentes. Esta disparidad en financiamiento limita no solo el desarrollo de capacidades técnicas locales, sino también la capacidad de países en desarrollo de definir agendas de investigación que respondan a sus necesidades y prioridades específicas (Juma et al., 2001; Sharma and Dutz, 2012).

Sharma and Dutz (2012) explora patrones existentes de innovación verde y presenta una visión general de políticas de innovación verde para países en desarrollo, argumentando que para promover innovación, políticas tecnológicas y ambientales funcionan mejor en conjunto. Este principio se aplica igualmente a tecnologías cuánticas: el desarrollo de capacidades cuánticas en países en desarrollo requiere coordinación entre políticas de ciencia y tecnología, educación, desarrollo industrial y cooperación internacional. Sin embargo, la capacidad institucional para tal coordinación de políticas frecuentemente es limitada en contextos de países en desarrollo.

La infraestructura de propiedad intelectual y regímenes de patentes constituye otra dimensión de desigualdad en el acceso a tecnologías cuánticas. Muchas de las innovaciones

fundamentales en computación cuántica, algoritmos cuánticos y aplicaciones están siendo patentadas por corporaciones y instituciones en países de altos ingresos. Si bien algunos recursos están disponibles como código abierto, componentes críticos del ecosistema cuántico están protegidos por propiedad intelectual restrictiva. Esto limita la capacidad de países en desarrollo de construir sobre innovaciones existentes y desarrollar aplicaciones adaptadas a sus contextos específicos sin incurrir en costos de licenciamiento potencialmente prohibitivos (Gu, 1999).

Las iniciativas de "democratización" de tecnologías cuánticas promovidas por corporaciones tecnológicas, si bien potencialmente beneficiosas, presentan sus propias limitaciones y riesgos. Como documenta Seskir et al. (2023), las empresas de computación cuántica utilizan el concepto de democratización de forma estrecha y limitada, frecuentemente refiriéndose simplemente a la provisión de acceso cloud a hardware cuántico. Sin embargo, el acceso técnico por sí solo es insuficiente si no está acompañado por capacidades educacionales, soporte técnico, recursos financieros para tiempo computacional y poder para influenciar el desarrollo de plataformas y estándares. Existe el riesgo de que estos modelos de "democratización" reproduzcan relaciones neocoloniales donde países en desarrollo son posicionados como consumidores pasivos de tecnologías desarrolladas y controladas en el Norte Global.

La dimensión de género en el acceso a infraestructura cuántica en países en desarrollo representa una intersección particularmente crítica de múltiples ejes de exclusión. Las mujeres en países en desarrollo no solo enfrentan las limitaciones generales de infraestructura que afectan a sus países, sino también barreras específicas de género en el acceso a educación avanzada, oportunidades de investigación, financiamiento, redes profesionales y movilidad internacional. La combinación de estas barreras configura un escenario de "exclusión múltiple" que requiere intervenciones específicamente diseñadas para abordar las dimensiones interconectadas de desigualdad (Krishnamurthy, 2022).

5. Barreras Específicas para la Participación Femenina

Las barreras que enfrentan las mujeres para participar en el ecosistema de tecnologías cuánticas son múltiples, interconectadas y operan en niveles que van desde estructuras macroeconómicas y políticas hasta prácticas institucionales, dinámicas interpersonales y internalizaciones individuales. Comprender estas barreras requiere un análisis que reconozca tanto sus especificidades en el contexto de tecnologías cuánticas como sus conexiones con patrones más amplios de exclusión de género en ciencia, tecnología y desarrollo económico.

La educación temprana en ciencias y matemáticas constituye un punto de entrada crítico donde se configuran trayectorias diferenciales por género. En muchos contextos, particularmente en países en desarrollo, las niñas enfrentan expectativas sociales, estereotipos de género y, en algunos casos, restricciones explícitas que limitan su acceso a educación de calidad en campos STEM. Los estereotipos que asocian competencia matemática y física con masculinidad, frecuentemente internalizados tanto por educadores como por estudiantes, pueden crear ambientes educativos hostiles o poco acogedores para niñas con intereses científicos (Nita et al., 2021).

Las limitaciones de recursos en sistemas educativos de países en desarrollo frecuentemente se manifiestan de manera particularmente severa para estudiantes mujeres. Cuando las familias deben priorizar inversiones educativas con recursos limitados, sesgos de género pueden resultar en que niños varones reciban preferencia para educación avanzada, especialmente en campos técnicos. Esta dinámica es exacerbada cuando la educación requiere movilidad geográfica o residencia lejos del hogar familiar, contextos donde preocupaciones sobre seguridad y normas sociales restrictivas frecuentemente limitan más severamente las opciones de niñas y mujeres jóvenes (Saleem and Higuchi, 2014; Raja and Christiaensen, 2017).

La transición de educación secundaria a educación superior en campos relacionados con física cuántica y computación representa un punto crítico de "filtración" donde la representación femenina disminuye significativamente. Los programas universitarios en física, matemáticas avanzadas y ciencia de la computación frecuentemente exhiben culturas departamentales que, implícita o explícitamente, marginalizan a estudiantes mujeres. La falta de modelos femeninos a seguir (role models), mentoría inadecuada, microagresiones de género y, en casos extremos, acoso y discriminación explícita, contribuyen todas a tasas diferenciales de persistencia y completación entre estudiantes mujeres versus varones en estos campos.

El acceso a oportunidades de investigación de pregrado y posgrado temprano, que son críticas para desarrollar expertise en tecnologías cuánticas, frecuentemente está mediado por redes informales y relaciones de mentoría que operan de maneras generizadas. Los profesores, que en campos como física cuántica son predominantemente varones, pueden, consciente o inconscientemente, invertir más tiempo y recursos en mentorear a estudiantes varones, invitarlos más frecuentemente a colaboraciones de investigación y recomendarlos más activamente para oportunidades competitivas. Estas dinámicas sutiles pero acumulativas resultan en ventajas compuestas para estudiantes varones y desventajas correspondientes para estudiantes mujeres.

La progresión de estudios de posgrado a posiciones postdoctorales y eventualmente a cargos académicos permanentes o de investigación representa otra etapa donde las bre-

chas de género se amplían. Las evaluaciones de productividad y excelencia en investigación frecuentemente no toman en cuenta de manera adecuada cómo responsabilidades de cuidado desproporcionadamente femeninas pueden afectar tasas de publicación, disponibilidad para redes profesionales y capacidad de dedicar tiempo ininterrumpido a investigación intensiva. En el contexto específico de investigación cuántica, que frecuentemente requiere acceso a equipamiento especializado localizado en centros de investigación de élite, las limitaciones en movilidad geográfica afectan desproporcionadamente a mujeres con responsabilidades familiares.

El "techo de cristal" las barreras para avanzar a posiciones de liderazgo en investigación cuántica y desarrollo tecnológico representan obstáculos significativos incluso para mujeres que logran establecer carreras en el campo. La subrepresentación femenina en comités de revisión de propuestas, paneles de selección de financiamiento, juntas editoriales de revistas y organizaciones de conferencias puede resultar en sesgos de evaluación que penalizan la investigación liderada por mujeres. Estudios en otros campos científicos han documentado que la investigación de mujeres tiende a ser evaluada más críticamente, recibir calificaciones más bajas por logros similares y enfrentar escrutinio más intenso que investigación comparable liderada por hombres.

Las redes profesionales y comunidades de práctica en computación cuántica frecuentemente operan de maneras que excluyen o marginalizan a mujeres. Conferencias, workshops y eventos de networking pueden desarrollarse en contextos y horarios que dificultan la participación de investigadoras con responsabilidades de cuidado. Las dinámicas sociales en estos espacios, incluyendo reuniones informales donde se forjan colaboraciones, frecuentemente reflejan culturas de género que pueden ser hostiles o excluyentes. El fenómeno de "manterrupting" (interrupción de mujeres por hombres), "mansplaining" (explicación condescendiente) y otros patrones de interacción generalizada pueden limitar la capacidad de mujeres de contribuir efectivamente y ser reconocidas por sus contribuciones.

El acceso a financiamiento para investigación y emprendimiento en tecnologías cuánticas exhibe sesgos de género documentados. Las propuestas de investigación lideradas por mujeres frecuentemente reciben tasas de éxito más bajas en competiciones de financiamiento, particularmente en campos técnicos. Las empresarias en tecnología cuántica enfrentan desafíos desproporcionados en acceso a capital de riesgo, con estudios en otros sectores tecnológicos demostrando que las empresas lideradas por mujeres reciben una fracción pequeña del financiamiento de venture capital comparado con empresas lideradas por hombres, incluso cuando controlan por factores como etapa de la empresa, sector y métricas de desempeño.

La dimensión internacional y transnacional de la investigación cuántica de vanguardia presenta desafíos específicos para mujeres en países en desarrollo. La participación efec-

tiva en colaboraciones internacionales frecuentemente requiere viajes extensos, estancias prolongadas en instituciones extranjeras y capacidad de reubicar geográficamente para acceder a mejores oportunidades. Estas demandas son particularmente desafiantes para mujeres con responsabilidades familiares, pero también están mediadas por factores culturales y restricciones de seguridad que pueden limitar más severamente la movilidad de mujeres versus hombres en ciertos contextos.

Las políticas de visa y migración para trabajadores altamente calificados, si bien técnicamente neutrales en género, pueden tener impactos diferenciados. Las mujeres que migran para oportunidades en investigación cuántica pueden enfrentar desafíos adicionales en términos de reconocimiento de credenciales, acceso a cuidado infantil en nuevos contextos y vulnerabilidad a situaciones de explotación laboral. Las políticas migratorias que privilegian a trabajadores "primarios" mientras restringen derechos de cónyuges pueden afectar de manera desproporcionada a mujeres científicas cuyas parejas pueden tener dificultades en acceder a oportunidades laborales.

La visibilidad y reconocimiento de contribuciones científicas operan de maneras generalizadas que afectan las carreras de mujeres en tecnologías cuánticas. El "efecto Matilda" (la tendencia de que logros científicos de mujeres sean atribuidos a colegas varones) y patrones de autocitación diferencial contribuyen a una subrepresentación de mujeres en métricas de impacto científico. Las invitaciones para dar charlas plenarias en conferencias, participar en paneles de expertos y contribuir a esfuerzos de divulgación de alto perfil frecuentemente fluyen hacia investigadores varones establecidos, privando a mujeres de oportunidades para construir reputación y expandir redes profesionales.

La interseccionalidad de género con otras dimensiones de identidad social agrava estas barreras de maneras complejas. Mujeres de grupos raciales o étnicos marginalizados, mujeres de clase trabajadora, mujeres con discapacidades y mujeres de orientaciones sexuales no heteronormativas enfrentan capas adicionales de discriminación y exclusión. En el contexto de países en desarrollo, donde muchas de estas intersecciones se combinan con limitaciones de recursos y contextos institucionales más débiles, las barreras se vuelven especialmente formidables.

Los códigos de vestimenta, normas de comportamiento profesional y expectativas de presentación personal en ambientes científicos y tecnológicos frecuentemente reflejan normas de género que pueden ser particularmente desafiantes para mujeres que navegan identidades múltiples. La necesidad de conformarse a expectativas de "profesionalismo" que están implícitamente codificadas en términos masculinos y occidentales puede crear cargas adicionales para mujeres, particularmente aquellas de contextos culturales no occidentales.

La falta de servicios de soporte para el cuidado infantil y responsabilidades familiares en instituciones de investigación y conferencias científicas presenta barreras prácticas

significativas. Las mujeres que son madres frecuentemente deben hacer elecciones difíciles entre participación en oportunidades profesionales críticas y cumplimiento de responsabilidades de cuidado. La ausencia de políticas institucionales robustas de licencia parental, arreglos de trabajo flexible y apoyo para cuidado infantil puede forzar a mujeres a salir temporalmente o permanentemente de trayectorias de investigación en momentos críticos de sus carreras.

El acoso sexual y la violencia de género en ambientes académicos y de investigación representan barreras serias pero frecuentemente invisibilizadas. Mientras las instituciones han comenzado a desarrollar políticas contra el acoso, la implementación efectiva frecuentemente es inadecuada, particularmente en contextos donde estructuras jerárquicas fuertes y culturas de silencio protegen a perpetradores. Las mujeres que experimentan acoso pueden enfrentar dilemas difíciles entre reportar incidentes y arriesgar represalias profesionales, particularmente en campos pequeños como la investigación cuántica donde la reputación y las redes son críticas.

La socialización de género y la autoeficacia tecnológica constituyen barreras más sutiles pero penetrantes. Incluso en ausencia de discriminación explícita, las mujeres pueden internalizar mensajes culturales sobre sus supuestas limitaciones en campos técnicos, resultando en síndrome del impostor, falta de confianza en sus capacidades y reticencia a autopromocionarse de maneras necesarias para avanzar en carreras competitivas. Estas dinámicas psicológicas son reforzadas por la falta de representación femenina en posiciones visibles y de liderazgo en tecnologías cuánticas.

6. Implicaciones Económicas y Sociales

Las implicaciones económicas y sociales de la brecha digital cuántica con dimensión de género son profundas y multifacéticas, operando en niveles que van desde oportunidades individuales y bienestar hasta estructuras económicas nacionales, dinámicas de desarrollo global y configuraciones futuras de poder geopolítico. La exclusión sistemática de mujeres, particularmente aquellas en países en desarrollo, del ecosistema emergente de tecnologías cuánticas no representa simplemente una cuestión de equidad y justicia social, sino que tiene ramificaciones económicas concretas que afectan la eficiencia del desarrollo tecnológico, la innovación y el crecimiento económico sustentable e inclusivo.

A nivel individual, la exclusión de mujeres de oportunidades educacionales, de investigación y laborales en tecnologías cuánticas representa una pérdida directa de potencial de ingresos y movilidad económica. Como documentan Sultana et al. (2024) y Zhuang (2025), las tecnologías emergentes como IA y, por extensión, tecnologías cuánticas, están creando nuevas categorías de empleo altamente remunerado en campos como desarrollo

de algoritmos, análisis de datos cuánticos, ingeniería de hardware cuántico y aplicaciones cuánticas especializadas. La exclusión de mujeres de estos campos de oportunidad económica contribuye a perpetuar y potencialmente amplificar brechas de género en ingresos y riqueza.

Las implicaciones para países en desarrollo como entidades colectivas son igualmente significativas. La capacidad de países de capturar beneficios económicos de tecnologías cuánticas, desarrollar industrias basadas en computación cuántica y participar competitivamente en la economía global emergente depende críticamente de su base de talento humano. La exclusión sistemática de la mitad de la población potencial de talentos limita severamente la capacidad de estos países de construir capacidades cuánticas robustas (Rodrigues and Costa, 2018; Karodia et al., 2014).

Gu (1999) desarrolla las implicaciones de Sistemas Nacionales de Innovación para países en desarrollo, argumentando que el sistema nacional de innovación es una síntesis a nivel nacional de insights sobre innovación tecnológica y cambio institucional, tornándose uno de los instrumentos de política más relevantes para desarrollo basado en conocimiento. Sin embargo, la efectividad de sistemas nacionales de innovación depende críticamente de la inclusión y movilización de todo el talento disponible. Sistemas que excluyen sistemáticamente a mujeres operan muy por debajo de su potencial de eficiencia.

La literatura sobre "fuga de cerebros" migración de talento científico adquiere dimensiones particulares cuando se considera la intersección de género y geografía. Lee (2001) demuestra que el capital humano, particularmente en niveles secundario y terciario de educación, desempeña un papel clave en determinar el desarrollo tecnológico. Las mujeres científicas de países en desarrollo que logran obtener formación avanzada en física cuántica o campos relacionados frecuentemente enfrentan oportunidades limitadas de carrera en sus países de origen, incentivando migración a centros de investigación en países de altos ingresos. Esta dinámica representa una pérdida doble para países en desarrollo: primero, la inversión en educación inicial que beneficia a otros países, y segundo, la pérdida de potencial contribución de estas mujeres al desarrollo tecnológico y económico local.

Las implicaciones para innovación y desarrollo de aplicaciones cuánticas adaptadas a necesidades de países en desarrollo son particularmente críticas. Como argumentan Juma et al. (2001) y Sharma and Dutz (2012), alcanzar objetivos de desarrollo sostenible requiere innovaciones tecnológicas que respondan a desafíos específicos de contextos de desarrollo, desde agricultura y gestión de recursos hídricos hasta sistemas de salud pública y adaptación al cambio climático. La exclusión de mujeres de países en desarrollo del ecosistema de innovación cuántica significa que las voces, perspectivas y conocimientos contextuales de estos actores están ausentes de procesos de diseño y desarrollo de aplicaciones, resultando potencialmente en tecnologías que no responden adecuadamente a

necesidades locales o que incluso pueden exacerbar desigualdades existentes (Ebua, 2023).

La dimensión de equidad en el acceso a beneficios de tecnologías cuánticas se conecta con debates más amplios sobre justicia distributiva en el desarrollo tecnológico. Troyer et al. (2024) define el acceso como una de las tres prioridades estratégicas para computación cuántica, argumentando que es esencial democratizar el potencial de crecimiento económico a través de desarrollo de habilidades, fuerza de trabajo, ecosistema e infraestructura digital. Sin embargo, la democratización efectiva requiere abordar explícitamente barreras de género y otras formas de exclusión que impiden la participación equitativa.

Las implicaciones para seguridad económica y resiliencia en países en desarrollo son significativas. A medida que las tecnologías cuánticas se vuelven más centrales en sectores estratégicos como comunicaciones, ciberseguridad, finanzas y defensa, los países y poblaciones excluidos de acceso y expertise en estas tecnologías enfrentarán vulnerabilidades crecientes. La exclusión de mujeres de expertise cuántico amplifica estas vulnerabilidades, particularmente dado que la ciberseguridad y la comunicación segura son áreas donde la participación diversa puede fortalecer resiliencia contra amenazas.

La literatura sobre automatización y desplazamiento laboral por tecnologías emergentes proporciona lecciones relevantes para anticipar impactos de tecnologías cuánticas. Kuban State Agrarian University et al. (2025) y Yolusever (2025) documentan que la automatización afecta desproporcionadamente a trabajadores de baja cualificación mientras crea oportunidades para trabajadores altamente cualificados. Si las mujeres en países en desarrollo están sistemáticamente excluidas de oportunidades de desarrollar cualificaciones en tecnologías cuánticas, enfrentarán vulnerabilidad aumentada a dislocaciones laborales sin capacidad de transicionar hacia nuevas oportunidades creadas por estas tecnologías (Sultana et al., 2024; Frank et al., 2019).

Acemoglu and Restrepo (2018a) y Acemoglu and Restrepo (2018b) desarrollan marcos teóricos sobre la relación entre automatización, creación de nuevas tareas y distribución de ingresos, enfatizando que el impacto neto de nuevas tecnologías en empleo y desigualdad depende críticamente del balance entre efectos de desplazamiento y efectos de creación de nuevas tareas. Si las nuevas tareas y oportunidades creadas por tecnologías cuánticas son capturadas desproporcionadamente por grupos ya privilegiados (hombres en países de altos ingresos), mientras que efectos de desplazamiento afectan más ampliamente a trabajadores vulnerables (incluyendo mujeres en países en desarrollo), el resultado será exacerbación de desigualdades existentes.

Las implicaciones para la estructura de la economía digital global son profundas. Bulatova et al. (2023) analiza nuevas dimensiones de asimetrías globales de desarrollo socioeconómico y comercio internacional en condiciones de tecnoglobalismo, argumentando que la división digital se manifiesta no solo en el uso de tecnologías digitales sino también en

los beneficios recibidos y el nivel de habilidades digitales. La emergencia de una "división digital cuántica" amenaza con crear una nueva capa de estratificación global donde países y poblaciones con acceso a capacidades cuánticas capturan beneficios desproporcionados mientras otros son marginalizados.

Los efectos de red y economías de escala en el desarrollo de tecnologías cuánticas significan que ventajas iniciales tienden a ser auto-reforzantes. Los países y grupos que establecen liderazgo temprano en expertise cuántico, infraestructura e innovación atraen inversión adicional, talento y oportunidades de colaboración, creando círculos virtuosos de acumulación de capacidades. Inversamente, países y grupos excluidos enfrentan círculos viciosos donde falta de capacidades iniciales limita oportunidades para construir capacidades, perpetuando rezagos (Karodia et al., 2014; Fieser and Malecki, 1993).

Las dinámicas de propiedad intelectual y captura de rentas de innovación en tecnologías cuánticas tienen implicaciones distributivas significativas. Si las innovaciones fundamentales en computación cuántica, algoritmos y aplicaciones son desarrolladas y patentadas predominantemente en países de altos ingresos y por actores corporativos grandes, los beneficios económicos de estas tecnologías fluirán desproporcionadamente hacia estos actores, mientras que países en desarrollo enfrentarán costos de licenciamiento y dependencia tecnológica. La exclusión de mujeres de países en desarrollo de procesos de innovación refuerza estos patrones de apropiación desigual de beneficios.

Las implicaciones para cohesión social y estabilidad política también merecen atención. El aumento de desigualdades económicas asociado con acceso diferencial a beneficios de tecnologías emergentes puede exacerbar tensiones sociales, alimentar descontento y potencialmente contribuir a inestabilidad. Schindler et al. (2021) y Korinek and Stiglitz (2019) enfatizan que los efectos distributivos de progreso tecnológico no son predeterminados sino dependen de marcos institucionales y opciones de política. La exclusión de mujeres de oportunidades tecnológicas representa no solo una injusticia sino un riesgo para cohesión social que requiere atención de política.

Krishnamurthy (2022) propone una agenda para colaboración entre comunidades de tecnología cuántica y derechos humanos, argumentando que es esencial garantizar que tecnologías cuánticas promuevan derechos humanos en lugar de perjudicarlos. El derecho a participación equitativa en los beneficios del progreso científico y tecnológico, reconocido en marcos internacionales de derechos humanos, implica obligaciones de abordar barreras sistemáticas que excluyen a mujeres y otros grupos marginalizados del ecosistema cuántico.

Las implicaciones para la gobernanza democrática de tecnologías emergentes son fundamentales. Seskir et al. (2023) argumenta que la democratización de tecnologías cuánticas requiere más que simplemente provisión de acceso técnico; requiere participación genuina de diversos stakeholders en procesos de definición de prioridades, establecimiento de

estándares y gobernanza. La exclusión de mujeres, particularmente aquellas en países en desarrollo, de estos procesos de gobernanza significa que las tecnologías cuánticas serán configuradas por un subconjunto estrecho de perspectivas, potencialmente resultando en trayectorias de desarrollo que no sirven intereses públicos amplios.

7. Conclusiones

El análisis desarrollado en este artículo revela que la intersección entre la brecha digital cuántica y la exclusión de género en países en desarrollo configura un escenario complejo de "exclusión múltiple" que amenaza con reproducir y amplificar patrones históricos de desigualdad tecnológica en formas particularmente perniciosas. Las tecnologías cuánticas, lejos de emerger como fuerzas neutras o inherentemente democratizadoras, están siendo desarrolladas y desplegadas dentro de estructuras sociales, económicas e institucionales profundamente marcadas por asimetrías de poder basadas en género, geografía, clase y otras dimensiones de estratificación social.

La evidencia presentada demuestra que las mujeres en países en desarrollo enfrentan barreras superpuestas y mutuamente reforzantes que limitan su acceso a educación en física cuántica y campos relacionados, oportunidades de investigación avanzada, redes profesionales internacionales, financiamiento para investigación y emprendimiento, infraestructura computacional cuántica y participación en comunidades globales de desarrollo cuántico. Estas barreras operan en múltiples niveles: desde limitaciones de recursos y infraestructura en países en desarrollo, hasta culturas institucionales excluyentes en universidades e industrias tecnológicas, dinámicas de poder en redes profesionales y sesgos implícitos en procesos de evaluación y reconocimiento científico.

La ausencia casi total de marcos de equidad, diversidad e inclusión en el discurso técnico dominante sobre tecnologías cuánticas, documentada por Wolbring (2022), es sintomática de una invisibilización más amplia de consideraciones sociales y de justicia en el desarrollo tecnológico. Esta invisibilización no es meramente una omisión teórica sino tiene consecuencias prácticas profundas, permitiendo que patrones de exclusión operen sin escrutinio crítico y sin intervenciones correctivas necesarias.

Las implicaciones económicas y sociales de esta exclusión son sustanciales y multidimensionales. A nivel individual, la exclusión de mujeres de oportunidades en tecnologías cuánticas representa pérdida de potencial de ingresos, movilidad económica y realización profesional. A nivel colectivo, limita la capacidad de países en desarrollo de construir capacidades cuánticas robustas, capturar beneficios económicos de estas tecnologías emergentes y participar competitivamente en la economía digital global. A nivel global, la exclusión sistemática de la mitad de la población mundial, y particularmente de aquellas

en contextos ya marginalizados, del desarrollo de tecnologías que configurarán estructuras económicas y sociales futuras constituye una forma de injusticia estructural con ramificaciones profundas para equidad, desarrollo sostenible y gobernanza democrática de la tecnología.

Sin embargo, este diagnóstico sombrío no debe conducir a fatalismo. La trayectoria del desarrollo de tecnologías cuánticas no está predeterminada sino es objeto de contestación y puede ser influenciada por intervenciones deliberadas y sostenidas en múltiples frentes. Las iniciativas emergentes en educación en ética cuántica (Meyer, 2023; Arrow et al., 2023), los esfuerzos para desarrollar marcos de gobernanza responsables (de Jong, 2022; Kop, 2023) y los llamados para democratización genuina del acceso cuántico (Troyer et al., 2024; Seskir et al., 2023) proporcionan puntos de entrada importantes para esfuerzos de cambio.

La agenda de investigación futura debe incluir estudios empíricos más detallados sobre la participación de género en educación e investigación cuántica en contextos específicos de países en desarrollo, análisis de las intersecciones entre género y otras dimensiones de identidad social (raza, clase, etnicidad, sexualidad, capacidad) en el acceso a tecnologías cuánticas, evaluaciones de la efectividad de diferentes modelos de intervención para promover inclusión y desarrollo de marcos conceptuales más robustos para entender las dimensiones de poder y justicia en el desarrollo de tecnologías emergentes.

Las implicaciones de política que emergen de este análisis son multifacéticas. A nivel de políticas educacionales, se requieren inversiones sostenidas en educación STEM de calidad para niñas y mujeres jóvenes, con particular atención a contextos de países en desarrollo donde brechas de género en acceso educacional permanecen pronunciadas. Esto incluye no solo expansión de acceso a educación formal sino también intervenciones para transformar culturas escolares y departamentales que marginalizan o excluyen a estudiantes mujeres de campos técnicos.

A nivel de políticas de investigación y desarrollo, los mecanismos de financiamiento para investigación cuántica deben incorporar explícitamente criterios de equidad y diversidad, no solo como consideraciones periféricas sino como elementos centrales de evaluación de excelencia. Esto puede incluir cuotas o metas de representación para investigadoras mujeres en proyectos financiados, requisitos de planes de diversidad e inclusión para propuestas de investigación y mecanismos de monitoreo y rendición de cuentas para garantizar implementación efectiva.

A nivel de desarrollo de infraestructura, las inversiones en capacidades cuánticas en países en desarrollo deben ser diseñadas explícitamente con atención a cómo el acceso será distribuido y quién será incluido o excluido. Los modelos de acceso cloud a hardware cuántico, si bien potencialmente beneficiosos, deben ser acompañados por inversiones en

educación, capacitación técnica y soporte que permitan participación efectiva. Las asociaciones internacionales para transferencia de tecnología y construcción de capacidades deben incorporar compromisos explícitos con equidad de género.

A nivel institucional, las universidades, laboratorios de investigación y empresas de tecnología cuántica deben desarrollar e implementar políticas robustas para promover diversidad e inclusión. Esto incluye esfuerzos proactivos de reclutamiento de mujeres, programas de mentoría y soporte profesional, políticas familiares que acomoden responsabilidades de cuidado, protocolos efectivos contra acoso y discriminación y mecanismos para promover liderazgo diverso.

A nivel de gobernanza global de tecnologías cuánticas, los marcos emergentes de regulación, estándares técnicos y cooperación internacional deben incorporar explícitamente voces y perspectivas de mujeres de países en desarrollo. Los procesos de gobernanza que son dominados exclusivamente por élites técnicas de países de altos ingresos corren el riesgo de desarrollar marcos que perpetúan exclusiones existentes. La inclusión genuina requiere no solo presencia simbólica sino poder efectivo para influenciar decisiones y configurar trayectorias de desarrollo.

Las limitaciones de este estudio deben ser reconocidas. Como análisis primariamente teórico basado en síntesis de literatura existente, carece de datos empíricos originales sobre participación de género en tecnologías cuánticas en contextos específicos de países en desarrollo. La investigación futura debe incluir estudios de caso detallados, análisis cuantitativos de patrones de participación y evaluaciones de impacto de intervenciones específicas. Adicionalmente, mientras este artículo ha enfatizado las dimensiones de género en intersección con geografía y desarrollo económico, análisis más profundos de cómo otras dimensiones de identidad social (raza, etnicidad, clase, sexualidad, capacidad) se entrelazan con estas dinámicas son necesarios para capturar completamente la complejidad de patrones de exclusión e inclusión.

En conclusión, la brecha digital cuántica con dimensión de género representa uno de los desafíos emergentes más críticos para el desarrollo equitativo y sostenible en el siglo XXI. Abordar este desafío requiere reconocimiento de que las tecnologías cuánticas no son artefactos técnicos neutrales sino están profundamente implicadas en configuraciones de poder, oportunidad y exclusión. Requiere también compromiso con intervenciones deliberadas y sostenidas en múltiples niveles para garantizar que los beneficios de estas tecnologías transformadoras sean compartidos equitativamente y que sus desarrollos sean guiados por valores de justicia, inclusión y dignidad humana universal. El momento para actuar es ahora, mientras las trayectorias del desarrollo cuántico aún están siendo configuradas y las oportunidades para intervención transformadora permanecen abiertas.

Referencias

Referencias

- Acemoglu, D. and Restrepo, P. (2018a). Artificial intelligence, automation and work. *SSRN Electronic Journal*.
- Acemoglu, D. and Restrepo, P. (2018b). The race between man and machine: Implications of technology for growth, factor shares, and employment. *American Economic Review*, 108(6):1488–1542.
- Ajagekar, A. and You, F. (2022). Quantum computing and quantum artificial intelligence for renewable and sustainable energy: A emerging prospect towards climate neutrality. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 165:112493.
- Arora, N. and Kumar, P. (2024). Sustainable quantum computing: Opportunities and challenges of benchmarking carbon in the quantum computing lifecycle. *arXiv.org*.
- Arrow, J. , Marsh, S. E., and Meyer, J. C. (2023). A holistic approach to quantum ethics education. In *2023 IEEE International Conference on Quantum Computing and Engineering (QCE)*, pages 119–128. IEEE.
- Bulatova, O., Reznikova, N., and Ivashchenko, O. (2023). Digital divide or digital inequality? new dimensions of global asymmetries of socio-economic development and international trade in the conditions of technoglobalism. *Visnik Mariupolskogo derzavnogo univrsitetu Seria Ekonomika*, 13(25):45–57.
- Cazzaniga, M. (2024). Gen-ai. *Staff Discussion*
- Coenen, C., Grinbaum, A., Grunwald, A., Milburn, C., and Vermaas, P. (2022). *Quantum technologies and society: Towards a different spin*. *NanoEthics*, 16(1):1–6.
- Dahlman, C. J., Mealy, S., and Wermelinger, M. (2016). *Harnessing the digital economy for developing countries*. *Technical report, Organisation for Economic Co-Operation and Development (OECD)*.
- Damayanti, C. (2024). *Quantum ethics: Navigating the intersection of quantum mechanics and metaethics in the digital era for a just and equitable society*. *Jurnal Filsafat*, 34(2):210.
- de Jong, E. (2022). *Own the unknown: An anticipatory approach to prepare society for the quantum age*. *Digital Society*, 1(2).

- de Wolf, R. (2017). *The potential impact of quantum computers on society*. *Ethics and Information Technology*, 19(4):271–276.
- Ebua, E. J. (2023). *Investigating the potential of technology to promote development and the ethical and social implications of technological innovation in the context of development*. *OALib*, 10(04):1–23.
- Fieser, J. B. and Malecki, E. J. (1993). *Technology and economic development: The dynamics of local, regional, and national change*. *Economic Geography*, 69(1):94.
- Frank, M. R., Autor, D., Bessen, J. E., Brynjolfsson, E., Cebrian, M., Deming, D. J., Feldman, M., Groh, M., Lobo, J., Moro, E., Wang, D., Youn, H., and Rahwan, I. (2019). *Toward understanding the impact of artificial intelligence on labor*. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 116(14):6531–6539.
- Gu, S. (1999). *Implications of national innovation systems for developing countries: Managing change and complexity in economic development*.
- Heeks, R. and Bukht, R. (2018). *Digital economy policy in developing countries*. *SSRN Electronic Journal*.
- Ho, K. T. M., Chen, K.-C., Lee, L., Burt, F., Yu, S., and Lee, P.-H. (2024). *Quantum computing for climate resilience and sustainability challenges*. In *2024 IEEE International Conference on Quantum Computing and Engineering (QCE)*, pages 262–267. *IEEE*.
- Juma, C., Fang, K., Honca, D., Perez, J. H., Konde, V., Lee, S. H., Arenas, J., Ivinson, A., Robinson, H., and Singh, S. (2001). *Global governance of technology: meeting the needs of developing countries*. *International Journal of Technology Management*, 22(7/8):629.
- Karodia, A. M., Soni, D., and David, J. E. (2014). *International competitiveness, globalization and technology for developing countries: Some reflections from previous research*. *Singaporean Journal of Business, Economics and Management Studies*, 2(9):25–34.
- Kop, M. (2023). *Quantum-elspi: A novel field of research*. *Digital Society*, 2(2).
- Korinek, A. and Stiglitz, J. E. (2019). *Artificial intelligence and its implications for income distribution and unemployment*. In *The Economics of Artificial Intelligence*, pages 349–390. *University of Chicago Press*.
- Krishnamurthy, V. (2022). *Quantum technology and human rights: an agenda for collaboration*. *Quantum Science and Technology*, 7(4):044003.

- Kuban State Agrarian University, Volga State University, Moscow Technical University, and Samara State Economic University (2025). The impact of automation and artificial intelligence on social inequality. Ekonomika i Upravlenie: Problemy, Resheniya.*
- Lahiri, A. (2024). Sociological implications of the digital divide: Exploring access to information and social inequality in the age of artificial intelligence and automation. Research Review International Journal of Multidisciplinary, 9(1):156–167.*
- Lainjo, B. (2024). The global social dynamics and inequalities of artificial intelligence.*
- Lee, J.-W. (2001). Education for technology readiness: Prospects for developing countries. Journal of Human Development, 2(1):115–151.*
- Meyer, J. C. (2023). A holistic approach to quantum ethics education.*
- Nita, L., Mazzoli Smith, L., Chancellor, N., and Cramman, H. (2021). The challenge and opportunities of quantum literacy for future education and transdisciplinary problem-solving. Research in Science & Technological Education, 41(2):564–580.*
- Pohjola, M. (2001). Information technology, productivity, and economic growth: international evidence and implications for economic development.*
- Possati, L. M. (2024). Quantum technologies: a hermeneutic technology assessment approach. NanoEthics, 18(1).*
- Priyanka, Dhuliya, P., Singh Rana, D., Goyal, S., Kukreti, S., and Pundir, S. (2024). Quantum computing for sustainable development: A framework for environmental and social impact. In 2024 International Conference on Advances in Computing, Communication and Materials (ICACCM), pages 1–7. IEEE.*
- Raja, S. and Christiaensen, L. (2017). The future of work requires more, not less technology in developing countries.*
- Rodrigues, M. and Costa, F. (2018). Technology and competitiveness: Technological innovation for developing economies growth.*
- Rosario, M. d. (2012). Ict in education policies and national development. In Post-Secondary Education and Technology, pages 17–38. Palgrave Macmillan US.*
- Saleem, A. and Higuchi, K. (2014). Globalization and ict innovation policy: Absorption capacity in developing countries. In 16th International Conference on Advanced Communication Technology, pages 409–417. Global IT Research Institute (GIRI).*

- Schindler, M., Korinek, A., and Stiglitz, J. (2021). *Technological progress, artificial intelligence, and inclusive growth*. IMF Working Papers, 2021(166):1.
- Seskir, Z. C., Umbrello, S., Coenen, C., and Vermaas, P. E. (2023). *Democratization of quantum technologies*. Quantum Science and Technology, 8(2):024005.
- Sharma, S. and Dutz, M. A. (2012). *Green Growth, Technology and Innovation*. World Bank.
- Sultana, F., Talpur, U., Iqbal, M. S., Ali, A., and Memon, K. H. (2024). *The macro-economic implications of automation and ai on labor markets and employment*. The Critical Review of Social Sciences Studies, 2(2):497–507.
- Troyer, M., Benjamin, E. V., and Gevorkian, A. (2024). *Quantum for good and the societal impact of quantum computing*.
- Vermaas, P. E. (2017). *The societal impact of the emerging quantum technologies: a renewed urgency to make quantum theory understandable*. Ethics and Information Technology, 19(4):241–246.
- Wang, Y. and Song, X. (2020). *Quantum science and quantum technology*. Statistical Science, 35(1).
- Warschauer, M. (2003). *Technology and Social Inclusion*. MIT Press.
- Wheatley Research Consultancy (2024). *Quantum shifts: The societal implications of quantum computing on security, privacy, and the economy*.
- Wolbring, G. (2022). *Auditing the 'social' of quantum technologies: A scoping review*. Societies, 12(2):41.
- Yago Malo, J., Lepori, L., Gentini, L., and Chiofalo, M. L. (2024). *Atomic quantum technologies for quantum matter and fundamental physics applications*. Technologies, 12(5):64.
- Yolusever, A. (2025). *Ai and automation: Reshaping the labor market*. Biga İktisadi ve İdari Bilimler Fakültesi Dergisi, 6(1):63–85.
- Zhuang, Y. (2025). *The influence of artificial intelligence on labor markets*. SHS Web of Conferences, 218:03030.